

## 延性金属板材のプレス成形限界

著者	氏原 創志
出版者	法政大学大学院理工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要．理工学・工学研究科編
巻	61
ページ	1-5
発行年	2020-03-24
URL	<a href="http://doi.org/10.15002/00022742">http://doi.org/10.15002/00022742</a>

# 延性金属板材のプレス成形限界

Press forming limit of ductile metal sheet

氏原 創志

Soshi UJIHARA

指導教員 大澤泰明

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

Transport equipment such as cars and aircraft are working to reduce weight. A common practice is to build the structure from lightweight materials. So far, attention has been focused on multi-materials that properly use lightweight materials that are suitable for the right materials from the steel body. Among them, ductility is one of the important factors in material selection. One of the ductility evaluations is the press forming limit. At the press forming limit, elongation at break from tensile tests is a specific criterion for setting the target value. However, the evaluation criteria for elongation are ambiguous.

The FLD (Forming Limit Diagram), which is mainly used for measuring the press forming limit of a sheet material, was used, and the problem of the evaluation standard value of the press forming limit of a ductile metal sheet was pointed out using a uniaxial tensile test and in-plane biaxial test. We then discuss the quantification of ductility.

**Key Words** : Press forming limit, In-Plane Deformation, limit strain, FLD, uniaxial test, biaxial test

## 1. 結論

現在、温室効果による地球温暖化、廃棄物量の増大など地球環境問題が人類に対して問われており<sup>1) 2)</sup>、その原因の一つとして、排気ガスによる温暖化の影響が挙げられる。そのため、自動車、航空機、船舶、鉄道車両などの輸送機を軽量化することにより、燃費を向上させる取り組みが為されている。その手段の一つが構造を軽量材で構成することである。これまでの基本材料としての鉄鋼材料主体から、アルミニウム、マグネシウム、チタン合金、複合材料等の軽量化素材の比率を増加させ、材料を適材適所に使いわけるマルチマテリアル化の重要性が大切なコンセプトとして、注目されている。

鉄鋼材に比較して、しかしながら、これらの軽量化素材は高価格であり、成形性の面でも難加工性が認識されていて、これらを克服する必要性が叫ばれている。NEDOの革新的新構造材料開発の数値目標は以下のように具体的に設定（引張強さ×伸び）されている。成形加工を巡る取り組みは議論の対象になっていない。

- |                 |               |
|-----------------|---------------|
| 1. 高強度高延性中高炭素鋼板 | 1.5GPa × 20%  |
| 2. 高強度・高靱性アルミ合金 | 0.6GPa × 15%  |
| 3. 難熱性マグネシウム合金  | 0.25GPa × 15% |
| 4. 革新的チタン合金     | 1.2GPa × 10%  |

材料自体の研究開発に加えて構造体として一体化する接合・締結に関する研究の重要性も格段に増大しており、接着剤の性能向上や摩擦攪拌接合 (FSW) の研究開発についても、鋭意努力を続ける必要性が認められる。

深絞りや曲げ加工、縮みフランジ、伸びフランジさらに張出し加工などを包含する一般的なプレス加工における成形性向上も取り組まなければならないテーマであり、各研究機関においてそれぞれ独自の取り組みが行われている。

本研究では、成形性向上を意図して研究されてきた内外のプレス加工研究を自研究室での展開を織り織り交ぜながら、延性金属板材のプレス成形における限界について解析的および実験的に考察した結果を提示する。

## 2. プレス成形限界

### 2.1 応力-ひずみ線図

単軸引張試験では、一様伸び限界までが単軸な応力状態であって、くびれの発現以降は単純な引張試験とは言えない。しかし、それを鑑みずにひずみ分布が生じてそのまま試験片が破断するまで試験を行うのが普通である。そのため、試験開始時から一様伸び限界までは平行変形、比例負荷は維持されているが、破断伸びについてはそれらが維持されていない。成形限界の面ではプレス成形限界

において弾性変形から塑性変形に移行する降伏点，安定変形から不安定変形に移行する最大荷重点，板厚くびれ発生時の限界ひずみは Hill の局部くびれ理論により  $n$  値の 2 倍になるなど，プレス成形の限界の節目は複数存在している。

## 2.2 成形限界線図(FLD)

板材のプレス成形限界の評価は加工材の受けるひずみ比  $\beta$  を  $\beta = 1$  から  $\beta = -1$  までとる FLD がその考察の対象になる。板材の成形限界の理論的予測方法が，いくつかあり，Swift の拡散くびれ限界，Hill の局部くびれ理論に始まり，M-K 理論<sup>3)</sup>，S-R 理論<sup>4)</sup>と呼ばれるものがその代表である。Swift は，一様変形中の薄板がある時点(最高荷重点)を境に一様変形が終わり，板幅方向に変形が集中し始めるという変形の不安定(拡散くびれ)を不安定限界とした。一方，Hill は板厚方向に変形が集中し始めるという変形の不安定(局部くびれ)を不安定変形とした。また S-R 理論では，局部分岐点の発生を破断条件として， $\beta > 0$  においても局部くびれが生じることを示した解析的評価方法がある。M-K 理論は Swift と Hill による  $\beta > 0$  では局部くびれが発生しないという矛盾を指摘した計算的評価法。Keeler&Goodwin による試験片にスタンプし，アルミや鉄などの伸びを測定する実験的評価法。他にも試験中に温度を意識的に降下させること(降温プロセス)<sup>5)6)</sup>で安定な変形能力が増大することを予測する解析的評価方法もある。

## 3. 破断伸びのゲージ長依存

引張試験を行い，デジタルビデオカメラで観察した引張試験の試験開始から破断までを 10 分割し，各段階におけるひずみ測定用格子の変化量について画像解析ソフトを用いて測定し，軸方向の軸ひずみ  $\varepsilon$  を算出した。最大荷重点以前は一様変形だが，最大荷重点以降は一様な変形ではなくなる。また，式(1) からひずみ分布の面積は伸びであり，横軸のゲージ長と縦軸の軸ひずみを掛け算した値をとる。よって，不安定変形している間のひずみ分布が山なりになる場合は，ひずみの平均値を計算に用いる。だからこそ勾配が急な破断時のひずみ分布においては，ゲージ長の大小が限界ひずみに大いに影響を及ぼすのである。この限界ひずみのゲージ長依存は二軸試験の場合においても同様に成立すると考えられる。

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot \cdot \cdot (1)$$

## 4. 試験材料の決定

### 4.1 供試材

本研究においては Al 合金 A1100-0 を供試材として用いた。A1100-0 は純度 99.0%以上をアルミニウムが占

め，純度が高くなるにつれて強度は低くなっていく。選定の理由としては純度が高く，組成が複雑でない点と，強度が低く，伸びが大きいので延性を評価するのに好ましい材料だという点が挙げられる。

### 4.2 特性値

試験より得られた結果から各特性値を求め，Table1 に示す。また，求めた特性値の意味合いおよび算出方法を以下に示す。すべての特性値は平均値，差を算出している。45° 方向の値を 2 倍にする理由は直交異方性理論に基づき，0°，45°，90°，-45° の 4 方向を考慮する。

Table.1 Mechanical properties of A1100-O

Angle to rolling direction/°	0°	45°	90°	$\bar{x}$	$\Delta x$
n value [-]	0.265	0.214	0.233	0.232	0.035
r value [-]	0.508	0.461	0.662	0.523	0.124
Tensile strength [MPa]	88.8	83.8	85.0	85.3	3.125

$$\bar{x} = (x_0 + 2x_{45} + x_{90})/4$$

$$\Delta x = (x_0 + x_{90} - 2x_{45})/2$$

## 5. 破断伸びと限界ひずみ

一般的な延性評価基準値は，破断伸びである。引張試験を行い，破断面を突き合わせて破断部をまたぐ初期標点間距離の伸びを測り算定する。これは公称ひずみで表示されるが，以後ここでは真ひずみ表示に統一する。また，限界ひずみの詳細な測定方法は一般的に考えられる中から，以下の 3 方法 (5.1, 5.2, 5.3) による。

### 5.1 くびれを含むゲージ長(G.L.)

破断時のひずみ分布から，軸方向の軸ひずみ  $\varepsilon_l$  は明らかにゲージ長依存が認められる。ゲージ長が小さくなればなるほど  $\varepsilon_l$  は大きくなり，ゲージ長が大きくなればなるほど  $\varepsilon_l$  は小さくなる。本実験では，くびれを含む 1 格子と 3 格子にて計測を行った(Fig.1 参照)。

### 5.2 くびれの最近接格子(M-K)

Marciniak<sup>7) 8)</sup>に倣い，くびれが発現し平面ひずみ変形へ移行した箇所の，くびれに最も近い格子を測定する方法を用いた(Fig2 参照)。

### 5.3 くびれと最近接格子の中間(Out/Safe)

平面ひずみ変形に移行したポイントをセーフ，試験片に光が通ったポイントをアウトとして二点の中間を限界ひずみとする方法を用いた(Fig.3 参照)。

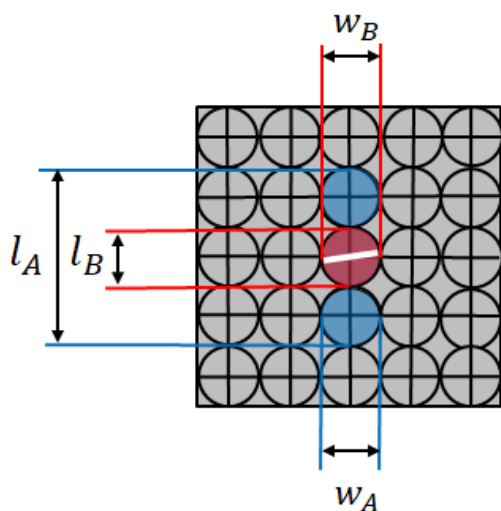


Fig.1 Gauge length with constriction (G.L.)

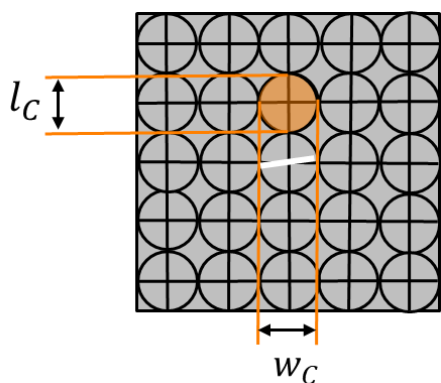


Fig.2 Constriction closest grid (M-K)

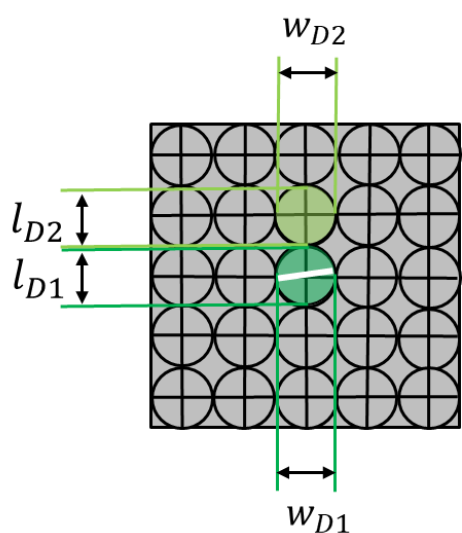


Fig.3 Between the constriction and the nearest grid (Out/Safe)

## 6. 二軸試験の課題

成形限界線図を評価するのに使用する二軸試験では曖昧な部分がある。代表的な例をとって、1つ目はFLDの絞り領域にあたる試験を行うことは困難である。絞り領域では引張りと圧縮の組み合わせによって求めるが、二軸試験の場合では Fig.4 の様に中央部において座屈が起き、破断しないので不可能であった。2つ目は本来、試験片の中央部に破断させ測定する。しかし Fig.5 の様にチャック付近を破断させ限界ひずみを測定する研究が存在する。他にも課題があり、きりがないが二軸試験はこの課題が解決されていないことが非常に問題である。



Fig.4 Biaxial test measurement is not possible in the drawing area

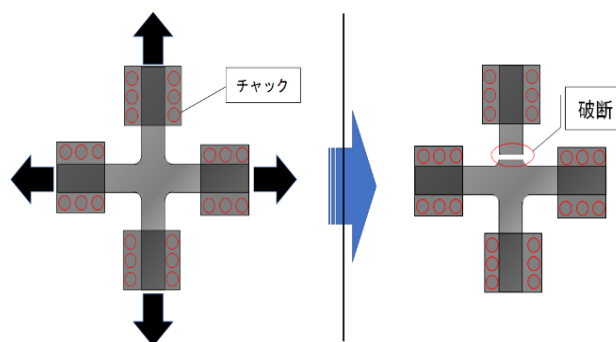


Fig.5 Problems of biaxial test

## 7. 単軸引張試験

圧延方向に対し  $0^\circ$  ,  $45^\circ$  ,  $90^\circ$  方向に切削加工した板厚 2mm の試験片に 1mm 格子パターンをスタンプし、単軸引張試験を行った。クロスヘッドスピード (C.H.S.) は 1mm/min に設定し、室温にて試験を行った。各特性値の算出およびグラフの作成にあたり、試験開始から終了までデジタルビデオカメラを用いてひずみ測定用の格子を観察し、その変化量を画像解析ソフトによって測定することよりひずみを算出した。限界ひずみが最も大きい値だったのが G.L.2 であり、最も小さい値だったのは G.L.6

であった。また、M-K の値から、破断の伸びが最近接格子の伸びに比べてかなり大きいことがわかる。このことより、ゲージ長が大きければ限界ひずみは小さく、小さければ大きくなる。

## 8. 二軸試験

圧延方向に対し $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  方向に切削加工した板厚2mm の試験片に2mm格子パターンをスタンプし、二軸試験を行った。クロスヘッドスピード (C.H.S.) は1mm/min に設定し、速度比(1.0, 0.7, 0.3, 0)にて、室温にて試験を行った。また、二軸試験もその変化量を画像解析ソフトによって測定することよりひずみを算出した。中央部での破断を発生させるために、中央部を薄肉して試験を行ったところ、中央部で破断が起きた。限界ひずみが最も大きい値だったのが単軸引張試験と同じG.L.2 であり、最も小さい値だったのはG.L.6 であった。また、M-K の値から、破断の伸びが最近接格子の伸びに比べてかなり大きいことがわかる。このことより、ゲージ長が大きければ限界ひずみは小さく、小さければ大きくなる。

限界ひずみという値は測定方法によって値を変える非常に曖昧なものといえる。

## 9. 引張試験における一様伸びの評価

単軸引張試験における局部伸びは標点間距離の影響をつよく受けることを示した<sup>9)</sup>。一様伸びは最高荷重点までのひずみを真ひずみで表示する。試験片全域で最初から一様に伸びてきてある時点からひずみの分布に差を生ずる段階を特定することは、かなり難しいといえる。最高荷重点までの延性は安定変形量であってプレス加工では、重要な量であり限界ひずみの一種でもある。

一様伸びを合理的に求める方法について考察した例を以下に示す。Fig.6 は引張試験が進行中のひずみを横軸にとり、縦軸には各段階のひずみの平均とひずみ分布を計測する各位置におけるひずみとの標準偏差をプロットした。さらにこの関係を 3 次式で近似してその変曲点を一様伸びと定めたものである。さらに、Fig.7 はおなじ標準偏差をひずみに対して、2 直線に近似し、その交点を一様限界と定めた結果を示している。大きく標準偏差が変化する時点が一様伸びとする方法である。

これら 2 方法による値の比較を Fig.8 に示す。n 値 0.263 に対して、前者では 0.107、後者では 0.231 となりいずれも一致の程度は大きくなく、いずれの方法も優れたやり方とは言えない。

最高荷重点までのひずみと一様伸びは、引張試験片が無限に長い場合に一致するとの研究もあり、材料の特性値としての一様伸びを n 値と同等と考えてよいかどうかは、今後の議論を待たねばならない。

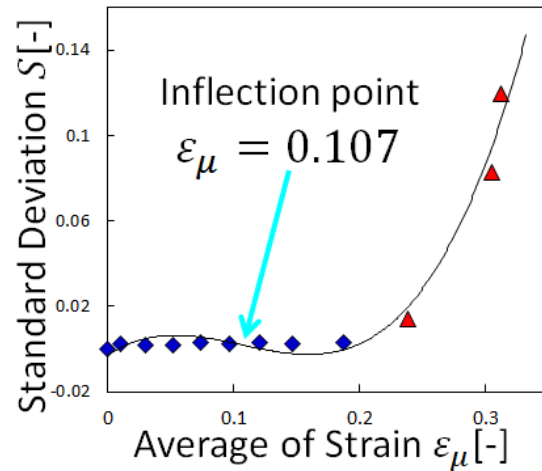


Fig.6 Method 1 of identification on uniform deformation

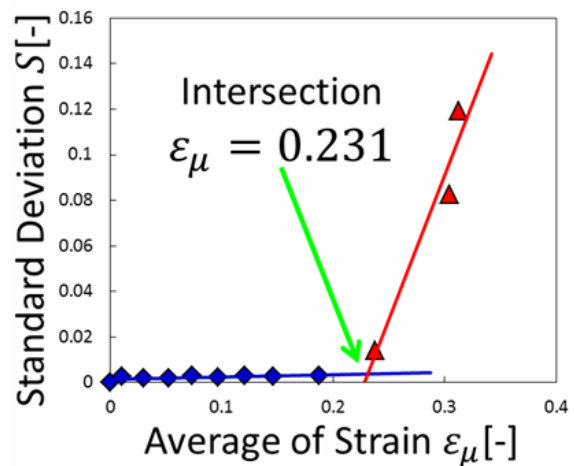


Fig.7 Method 2 of identification on uniform deformation

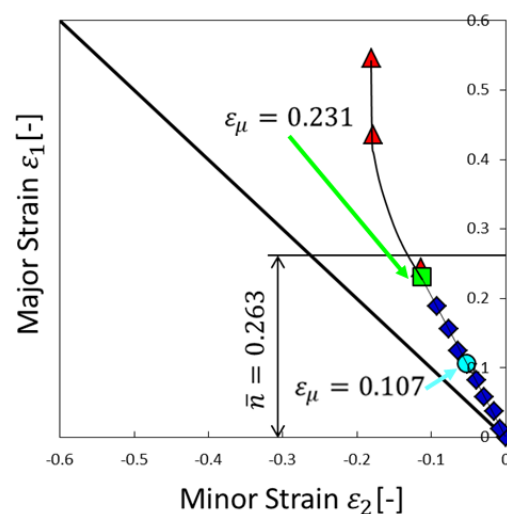


Fig.8 Identification on uniform deformation in tensile testing



## 10. 成形限界曲線(FLC)

本実験で行った 3 方法による限界ひずみの測定を 成形限界曲線(FLC)<sup>10)</sup>として Fig.9 にまとめた. Fig.9 からどの応力状態下においても G.L.2 の値が最も大きいことがわかる. また, 測定方法によって, 限界ひずみの値は大きく異なる. このことから, くびれに近いほど, ひずみが大きい値をとるためにゲージ長さが大きくなるほどに限界ひずみが小さくなり, 小さくなるほどに大きくなる. よって, 限界ひずみの取り扱いには測定方法に留意して扱う必要がある.

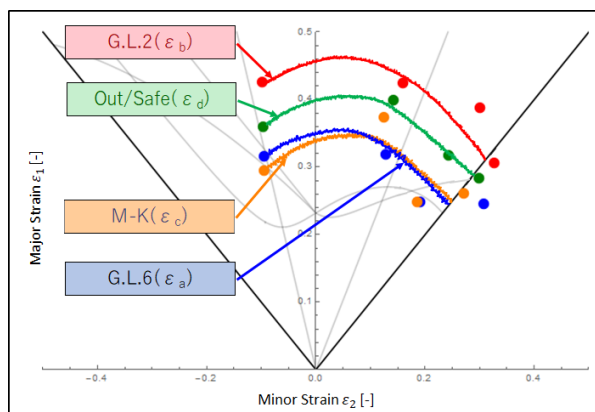


Fig.9 FLC

## 11. Swift の拡散くびれ限界における極大と極小

古典的な拡散くびれ限界は Swift によって提唱され, 広いひずみ範囲で一様成形の限度を示唆するものとして, プレス成形の議論で多用されるものである.

$n$  乗硬化材を考え, 比例荷重に限定した場合, 1 軸方向のひずみ $\epsilon_1$ は式(2)のように表せる. 張り出し領域では軸ひずみが極大となる極大点, 絞り領域では軸ひずみが極小となる極小点が認められる. 従来, 引張平面ひずみ変形経路が軸ひずみ最小となるように受け取られているが, 拡散くびれ限界とは一致していない.

Swift の拡散くびれ限界を表す軸ひずみを, 微分することによって極大値を与えるひずみ比を計算して求めると 0.484, 極小値をしめすひずみ比は-0.290 となり, これを Fig.10 に示す. これらのひずみ比がどのような変形を示唆するのか不明であるが, 実験的にも検討することが必要とである.

$$\epsilon_1 = \frac{2n(1+\beta+\beta^2)}{(1+\beta)(2-\beta+\beta^2)} \cdot \cdot \cdot (2)$$

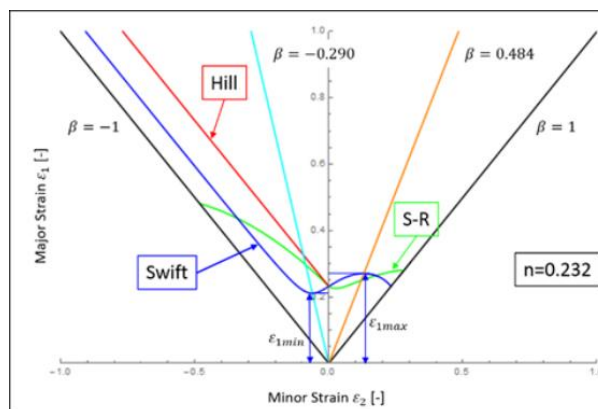


Fig.10 Swift's diffusion constriction limit

## 12. 結言

プレス成形限界の議論における『伸び』は, 成形性の様な定量化指標である. 十分推定するためには更なる実験にて測定する必要がある. 『伸び』の同定にあたっては, 本研究から示唆されるように, 評価基準, 定義によって大きく変動するので, 特に材料開発においては, 数値の取り扱いに注意することが必要である.

### 謝辞

本研究に際して, 様々なご指導ならびに助言を頂いた法政大学大学院, 指導教員である大澤泰明教授に深く感謝致します.

また, 共に研究生活を行うとともに, 常に協力および適切な助言を頂いた, 加工工学研究室, 修士課程 2 年の八巻智哉君に心より感謝いたします. 並びに研究活動において数々のご協力頂いた同研究室の皆様にも深く感謝致します.

### 参考文献

- 1) 日本アルミニウム協会, アルミニウム 第 21 巻 第 89 号, (2014), pp. 8-11
- 2) 日本アルミニウム協会, アルミニウム 第 21 巻 第 90 号, (2014), pp. 18-24
- 3) Z. Msrciniak & K. Kuczynski : LIMIT STRAINS IN THE PROCESSES OF STRETCH-FORMING SHEET METAL, 1967, vol. 9, pp. 609-620
- 4) S. STOREN and J. R. RICE : LOCALIZED NECKING IN THIN SHEETS, 1975, vol. 23, pp. 421-441
- 5) 茂木寛: 金属板材の成形性に及ぼす降温プロセスの効果, 法政大学大学院工学研究科修士論文, 2007
- 6) 吉澤宗晴・大澤泰明, 機論, 60-575, A(1994), pp. 1597-1603
- 7) 後藤学: 板の成形限界に関する理論的考察 I, 塑性と加工, 34-386, pp. 226-231, 1993
- 8) 後藤学: 板の成形限界に関する理論的考察 II, 塑性と加工, 34-388, pp. 454-461, 1993
- 9) 長谷川堅士: 単純な応力状態下における金属板材の延性評価, 法政大学理工学部卒業論文, 2016
- 10) 坂根昇: 金属板材の面内二軸試験における限界ひずみの計測と評価, 法政大学大学院工学研究科修士論文, 2017